

## محاسبات دزیمتری و بررسی تاثیر حفاظ بر تابش‌های ناشی از رویدادهای خورشیدی با استفاده از کد FLUKA

حمیده بیگ زاده جلالی<sup>۱</sup>، غلامرضا رئیس علی<sup>۲</sup>، سید امیرحسین فقهی<sup>۳</sup>، علیرضا بابازاده<sup>۱</sup>

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه قم؛ ۲- پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران؛

۳- دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\*نویسنده عهده دار مکاتبات (raisali@aeoi.org.ir)

### چکیده

خطرات پرتوهای کیهانی به عنوان یک عامل محدودکننده در مدت زمان مأموریت های فضایی، به شمار می رود و از این رو حفاظ سازی در مقابل پرتوها مسئله ای مهم در موفقیت مأموریت های فضایی است. در این رابطه محاسبات حفاظ و دزیمتری از طریق شبیه سازی بر پایه کدهای ترابرد پرتوها و فانتوم های معادل بدن انسان، نقش موثری در جهت طراحی و بهینه سازی حفاظ در برابر پرتوهای کیهانی ایفا می کند. در این تحقیق با بهره گیری از کد مونت کارلوی FLUKA همراه با یک مدل ساده از فضاپیما و فانتوم معادل بدن انسان، دز دریافتی توسط پوست و بدن ناشی از پرتوگیری یک رویداد خورشیدی، برای ضخامت های مختلف دو حفاظ آلومینیومی و پلی اتیلنی حساب شده است. کاهش قابل ملاحظه مقدار دز دریافتی در فانتوم معادل بدن با افزایش ضخامت حفاظ های موردتحقیق، بیانگر میزان کارایی آن ها در برابر تابش های فضایی مربوط به رویدادهای خورشیدی است. هم چنین از بین دو حفاظ بررسی شده در این تحقیق پلی اتیلن ویژگی های حفاظتی بهتری را نسبت به آلومینیوم نشان می دهد.

کلیدواژه: تابش فضایی، دز، حفاظ، رویداد خورشیدی، کد FLUKA

### ۱- مقدمه

طرح ریزی و انجام مأموریتی برای سفر به مریخ یکی از برنامه های ناسا در نیمه اول قرن حاضر است. با در نظر گرفتن تکنولوژی کنونی، چنین مأموریتی در حدود دو سال به طول می انجامد. در این مدت فضانوردان به طور پیوسته تحت تابش پرتوهای کیهانی با آهنگ دزی از مرتبه  $1 \text{ mSv/day}$  قرار دارند و برای اکثر دوره مأموریت از حفاظت میدان ژئومغناطیسی زمین بهره مند نیستند [۱]. پرتوهای کیهانی از پروتون ها، ذرات آلفا و یون های سنگین در محدوده انرژی ده ها  $\text{MeV/nucleon}$  تا صدها  $\text{GeV/nucleon}$  تشکیل شده اند. به علاوه ممکن است در طول دوره مأموریت یک یا دو رویداد خورشیدی اتفاق بیفتد که سبب افزایش شارش پروتون ها تا مقادیر  $10^{11} \text{ Proton/cm}^2$  در عرض چند ساعت یا چند روز شود. تابش فضایی، اثرات احتمالی و قطعی متفاوتی را بر سلامتی فضانوردان و عملکرد تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده در شاتل به دنبال خواهد داشت که در این تحقیق تنها به مورد اول پرداخته شده است.



فضانوردان از نظر میزان پرتوگیری در گروه پرتوکاران طبقه بندی می شوند و دز دریافتی توسط آن ها باید در محدوده دز مجاز تصویب شده توسط NCRP قرار گیرد [۲]. به دلیل کمبود دانش بشری از چگونگی تاثیر یون های سنگین و پرتوهای موجود در تابش های کیهانی، تاکنون هیچ حدی برای ماموریت ها در عمق فضا ارائه نشده است و محدودی که برای مدارهای پایین زمین به تصویب رسیده است به عنوان یک راهنما مدنظر قرار می گیرد [۲].

اطلاعات گوناگونی برای محاسبه میزان پرتوگیری در یک ماموریت فضایی مورد نیاز است که به طور خلاصه عبارتند از: محیط تابش، مدل های حفاظ سازی فضایی، مدل بدن انسان، کدهای تراپد تابش، شیوه های تبدیل شدت و طیف ذرات به کمیت های مفید برای ارزیابی ریسک و معیاری برای سنجش میزان پرتوگیری. بسیاری از این اطلاعات با استفاده از مدل ها و کدهای موجود فراهم می شوند. برخی از کدهایی که به این منظور طراحی و توسعه داده شده اند عبارتند از: HZETRN [۳]، SHIELD-HIT [۴]، HETC [۵] و PHITS [۶]. به غیر از کد HZETRN که یک کد تحلیلی است، سایر کدها از روش مونت کارلو استفاده می کنند.

در تحقیق حاضر از کد FLUKA برای شبیه سازی و انجام محاسبات استفاده شده است. کد FLUKA تراپد و اندرکنش گسترده وسیعی از تابش ها با انرژی های مختلف را با روش مونت کارلو شبیه سازی می کند. در این کد امکان تعریف انواع چشمه با توزیع مکانی و زاویه ای و انرژی معین با استفاده از تدوین زیربرنامه source وجود دارد.

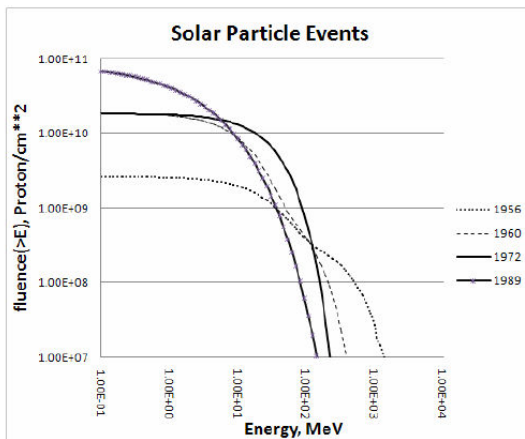
## ۲- محیط تابش و مدل های محاسباتی

آن دسته از پرتوهای کیهانی که از خورشید سرچشمه می گیرند، پرتوهای کیهانی خورشیدی نامیده می شوند. در این دسته از پرتوها، فراوانی پروتون ۹۵ درصد، آلفا ۴ درصد و هسته های سنگین کمتر از یک درصد است. انرژی ذرات خورشیدی از ۱ keV تا ۲۰ GeV تغییر می کند و انرژی بیشتر ذرات در گستره میلیون الکترون ولت قرار دارد. برخی رویدادها مانند شراره های خورشیدی و فوران های تاجی خورشید در زمان فعال بودن چرخه خورشیدی، سبب افزایش انرژی و سطح شار ذرات می شوند. بیشینه انرژی ذرات در یک رویداد، عمدتاً بین ۱۰ MeV تا ۱۰۰ MeV متغیر است که این میزان در مواردی به ۱ GeV (تقریباً در هر یک سال) تا ۱۰ GeV (تقریباً در هر ۱۰ سال) نیز می رسد [۷].

شراره های خورشیدی از بزرگترین رویدادهای انفجاری در منظومه شمسی به شمار می روند. ابرهای ذرات پرتوهای که پس از این رویدادها آزاد می شوند، برای فضانوردانی که دارای حفاظ مناسب نیستند، کشنده است. رویدادهای بزرگ به دوره بیشینه فعالیت خورشیدی محدود می شوند ولی وقوع رویدادهای کوچک

در دوره فعالیت کمینه نیز محتمل هستند. این رویدادها از لحاظ زمان وقوع و مشخصات طیفی غیرقابل پیش بینی هستند.

رویدادهای فوریه ۱۹۵۶، نوامبر ۱۹۶۰، آگوست ۱۹۷۲ و اکتبر ۱۹۸۹ بزرگترین رویدادهایی هستند که تاکنون رخ داده اند. برای هر یک از این رویدادها، طیف انرژی شارشی متفاوتی پیشنهاد شده است [۸]. در شکل ۱ طیف شارش پروتون‌ها برای هر یک از این رویدادها بر اساس روابط مندرج در مرجع ۸ ترسیم شده است. محاسبات نشان می‌دهند که حدود ۹۷ درصد از دریافتی از پرتوهای خورشیدی ناشی از پروتون‌هاست [۹].



شارش پروتون‌های آزاد شده در رویداد ۴ آگوست ۱۹۷۲ تقریباً برابر ۹۷ درصد شارش سالانه ذرات خورشیدی بوده است. احتمال وقوع رویدادی بزرگتر از این رویداد، ۳ درصد تخمین زده شده است. لذا طیف شارش این رویداد به طور گسترده در محاسبات حفاظ سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰]. محاسبات انجام شده در این تحقیق بر مبنای این رویداد خورشیدی می‌باشد.

شکل ۱- طیف انرژی شارش ۴ رویداد بزرگ خورشیدی

طیف انرژی شارش پروتون‌های رویداد آگوست ۱۹۷۲ با رابطه (۱) تقریب زده می‌شود [۸].

$$\phi(> E) = 6.6 \times 10^8 \exp\left(-\frac{E-100}{30}\right) \quad (1)$$

در این جا E انرژی بر حسب MeV و  $\phi(> E)$  شارش برای انرژی‌های بزرگتر از E بر حسب پروتون بر  $\text{cm}^2$  است.

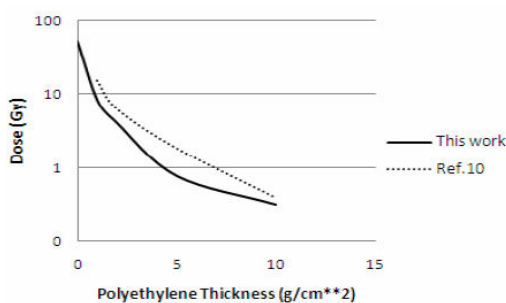
در این پژوهش یک چشمه‌ی تابش گسترده همسانگرد با طیف انرژی رویداد ۱۹۷۲ در نظر گرفته شده است. در این تحقیق از یک استوانه آب با شعاع ۱۵cm و ارتفاع ۳۰cm (معادل کره ICRU) به جای فانتوم معادل بدن انسان بهره گرفته شده و ضخامت ۱/۵ mm از این استوانه به عنوان پوست در نظر گرفته شده است. برای فضایی یک هندسه ساده کروی با در نظر گرفتن ضخامتی به عنوان حفاظ آن مدل سازی شده و فانتوم در مرکز این پوسته کروی بزرگ قرار داده شده است. فضای بین پوسته و استوانه آب از هوا پر شده است. ضخامت پوسته حفاظ مشابه کارهای تحقیقاتی انجام شده در این زمینه [۱] برابر با  $1 \text{ g/cm}^2$  (حفاظ نوعی

یک لباس فضانوردی)،  $2 \text{ g/cm}^2$  (حفاظ سبک برای یک فضاییما)،  $5 \text{ g/cm}^2$  (حفاظ یک فضاییمای نوعی) و  $10 \text{ g/cm}^2$  ( ضخامت حفاظ مورد استفاده یک حفاظ توفان که در حالت وقوع یک رویداد خورشیدی شدید) در نظر گرفته شده است.

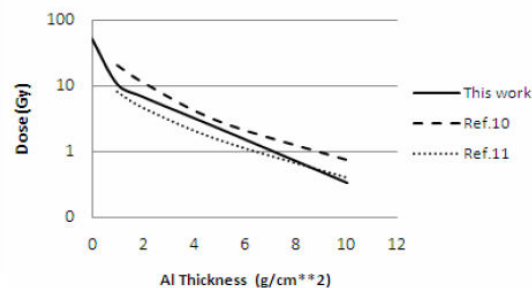
محاسبات برای آلومینیوم و پلی اتیلن به عنوان ماده حفاظ انجام گرفته است. خواص مناسب آلومینیوم و از همه مهم تر ویژگی سبک بودن آن سبب شده که این فلز به طور گسترده در صنایع هوایی به کار گرفته شود. مواد پلیمری و به خصوص پلی اتیلن نیز اخیرا به عنوان جایگزینی برای آلومینیوم مطرح شده اند.

### ۳- نتایج

شکل های ۲ و ۳ مقایسه نتایج محاسبه شده در این گزارش با دو کار تحقیقاتی دیگر در این زمینه را نشان می دهند. در مرجع ۱۱ نتایج با استفاده از کد FLUKA و دو فانتوم شبیه انسان "مدل ریاضی و مدل وکسلی(voxel)" و هم چنین در نظر گرفتن هندسه استوانه ای برای فضاییما بدست آمده اند. در مرجع ۱۰ ضمن استفاده از کد HZETRN، از داده های ماهواره IMP برای تعریف طیف انرژی چشمه، از مدل CAM برای بدن انسان و هندسه کروی برای فضاییما بهره گرفته است. همانگونه که نمودارها نشان می دهند با افزایش ضخامت حفاظ، دز دریافتی به صورت قابل توجهی کاهش می یابد. تنها ضخامت  $1 \text{ g/cm}^2$  از حفاظ میزان دز دریافتی را به حدود ۲۰ درصد و افزایش ضخامت حفاظ تا  $10 \text{ g/cm}^2$  این میزان را به حدود ۱ درصد کاهش می دهد.



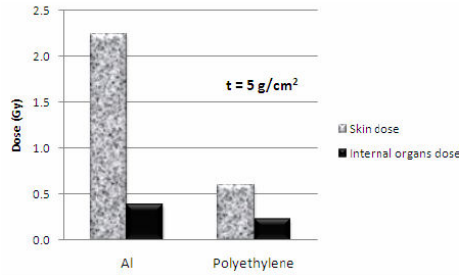
شکل ۳- مقایسه نتایج محاسبه شده برای حفاظ پلی اتیلن با مقادیر گزارش شده .



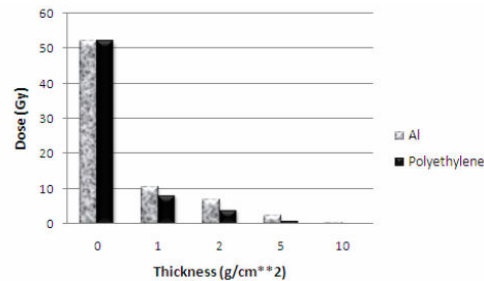
شکل ۲- مقایسه نتایج محاسبه شده برای حفاظ آلومینیوم با مقادیر گزارش شده.

تفاوت در مقادیر گزارش شده می تواند به دلیل استفاده از طیف های انرژی متفاوت برای چشمه و هم چنین مدل های مختلف در نظر گرفته شده برای بدن انسان باشد. محاسبات نشان می دهد استفاده از طیف King،  $\phi(> E) = 7.9 \times 10^9 \exp[-(E - 30)/26.5]$ ، برای تعریف چشمه و تغییر ضخامت پوست از ۲ mm به ۰/۱ mm دز جذب شده به وسیله پوست را ۶۷ درصد افزایش می دهد[۸].





شکل ۵ - مقایسه دز دریافتی توسط پوست و اندام های داخلی بدن.



شکل ۴ - مقایسه دز دریافتی توسط پوست برای ضخامت های مختلف آلومینیوم و پلی اتیلن.

در شکل ۴ مقایسه دز جذب شده توسط پوست در ضخامت های مختلف آلومینیوم و پلی اتیلن نشان می‌دهد که پلی اتیلن ویژگی حفاظتی بهتری را از خود نشان می‌دهد. در شکل ۵ مقایسه ای از میزان دز دریافتی توسط پوست و اندام های داخلی بدن برای ضخامت  $5 \text{ g/cm}^2$  از آلومینیوم و پلی اتیلن مقایسه شده است. این مقایسه نه تنها نقش حفاظتی پوست برای اندام های داخلی بدن را روشن می‌سازد بلکه آب را نیز به عنوان یک شیلد موثر در برابر پرتوهای خورشیدی مطرح می‌کند.

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

مثالی از کاربرد کد FLUKA برای مسئله حفاظت در برابر تابش های خورشیدی با تاکید بر میزان دز دریافتی توسط پوست در یک فانتوم معادل بدن ارائه شد. محاسبات برای رویداد خورشیدی آگوست ۱۹۷۲ تحت شرایط مختلف برای نوع و ضخامت حفاظ در یک مدل ساده از فضاپیما انجام گرفت. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که دز دریافت شده توسط پوست و بدن با افزایش ضخامت حفاظ، کاهش می‌یابد و اندام های داخلی بدن نسبت به پوست دز کمتری را دریافت می‌کنند. پلی اتیلن به عنوان یک ماده مطرح در حفاظ سازی از ویژگی های حفاظتی بهتری نسبت به آلومینیوم برخوردار است.

انجام محاسبات دزیمتری برای پرتوهای کیهکسانی در ماموریت های بلند مدت به عنوان گزینه بعدی برای تحقیق مدنظر قرار گرفته است. هم چنین انجام محاسبات با در نظر گرفتن هندسه های پیچیده و کامل تر برای فضاپیما و بهره گیری از سایر گزینه های مطرح به عنوان حفاظ جهت رسیدن به شرایط بهینه حفاظ و انجام محاسبات و تحلیل پاسخ اجزای الکترونیکی در برابر تابش فضایی به عنوان موضوعات ارزشمند دیگر جهت مطالعات آینده مدنظر می‌باشد.

## مراجع

۱. F. Ballarini, G. Battistoni, F. Cerutti, A. Fasso` , A.Ferrari, E. Gadioli, M.V. Garzelli, A. Mairani, A. Ottolenghi, H.G. Paretzke, V. Parini, M. Pelliccioni, L. Pinsky, P. Sala, D. Scannicchio, S. Trovati, M. Zankl, "GCR and SPE Organ Doses in Deep Space with Different Shielding: Monte Carlo simulations based on the FLUKA Code coupled Anthropomorphic Phantoms", *Adv. Space Res.* ۷۳,۱۷۹۱-۱۷۹۷, ۲۰۰۶.
۲. National Council on Radiation Protection and Measurements, "Recommendations of Dose Limits for Low Earth Orbit", *NCRP ۱۳۲*, NCRP, Bethesda, M.D., ۲۰۰۰.
۳. John W. Wilson, Walter Schimmerling, Govind S. Khandelwal, Ferdous Khan, John E. Nealy, Francis A. Cucinotta, Lisa C. Simonsen and Judy L. Shin, "Transport Methods and Interactions for Space Radiations", *NASA Reference Publication* ۱۲۵۷, ۱۹۹۱.
۴. I. Gudowska , N. Sobolevsky, P. Andreo, D. Belkic D and A. Brahme, "Ion Beam Transport in Tissue-like Media using the Monte Carlo code SHIELD-HIT", *Phys. Med. Biol.* ۴۹, ۱۹۳۳-۱۹۸۵, ۲۰۰۴.
۵. T. Miller, L. Townsend, "Double Differential Light ion Production Cross Sections", *Radiat. Prot. Dosim.*, ۲۰۰۴a.
۶. H. Iwase, K. Niita, T.J. Nakamura, " Development of a general purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code", *Nucl. Sci. Technol.* ۳۹, ۱۱۴۲, ۲۰۰۲.
۷. R. A. Mewaldt, Cosmic Rays, "MacMillan Encyclopedia of Physics", *J. S. Rigden Editor in Chief, MacMillan, New York*, ۱۹۹۶.
۸. John W. Wilson, Francis F. Badavi, Francis A. Cucinotta, Judy L. Shinn, Gautam D. Badhwar, R. Silberberg, C. H. Tsao, Lawrence W. Townsend, and Ram K. Tripathi,, "HZETRN: Description of a Free-Space Ion and Nucleon Transport and Shielding Computer Program", *NASA Technical paper* ۳۴۹۵, ۱۹۹۵.
۹. W. Schimmerling<sup>۱</sup>, J. W. Wilson<sup>۲</sup>, F. Cucinotta<sup>۳</sup>, and M-H Y. Kim<sup>۲</sup>, "Requirements for Simulating Space Radiation with Particle Accelerators", *Technical Report. NASA-۹۸-iwrhi-ws.*, ۱۹۹۸.